

未知の星間分子を探して

—実験室と星間空間での分子分光—

山 本 智*

1. はじめに

OH ラジカルによる波長 18 cm の電波の吸収線がカシオペア A でとらえられたのは 1968 年。それが電波で見つかった初めての星間分子であった。1968 年以後、アンモニア (NH₃)、水 (H₂O)、一酸化炭素 (CO)、そして青酸 (HCN) といった分子が次々と発見され、これまでに見つかった星間分子は 70 に及ぶ。これらの分子が存在するのは、水素分子密度が 1-10⁶ cm⁻³、温度が 10-100 K の冷たい分子雲である。電波領域 (おもにマイクロ波領域) の分子の回転スペクトルはこのような分子雲の物理状態と化学組成について多くの情報をもたらしている。

星間分子の発見の歴史を辿ってみると図 1 のようになる。ミリ波の電波望遠鏡が動き出した 1971 年から第一の発見ラッシュを迎えた。星間空間における化学組成から有望そうな分子を考えて探索が行われた。対象としてはおもに化学的に安定な分子が中心であった。このような分子については、実験室のマイクロ波分光により、その回転スペクトルが詳細に調べられていたからである。しかし、星間空間で分子が作られる過程では、反応中間体としてフリーラジカルや分子イオンが重要な役割を果している。これらの分子は反応性が極めて高いので地上の実験室ではすぐまわりの分子と反応してしまい、ほんの僅かの寿命 (例えば 1/100 秒) しかもたない。ところが、低温で希薄な分子雲の中では何年にもわたって存在できる。これらの反応中間体を星間空間で検出すること

は、星間分子の生成のメカニズムを明らかにするうえで決定的に重要である。しかし、1970 年代はじめには、フリーラジカルの回転スペクトルはいくつかの簡単な分子で知られているだけであった。そのような分子を実験室で作ってスペクトルを測ることがようやく始まったばかりだったのである。

一方、電波望遠鏡による星間分子の探索の中で、それまで既知のいかなる分子のスペクトルにも合わないスペクトル線が見つかることがあった。その代表が 1970 年に見つかった周波数 89189 MHz の輝線で、X-ogen と名付けられた。ハーバード大学のクレンペラーはイオン分子反応による星間分子生成のプロセスの考察から、この X-ogen が HCO⁺ という分子イオンではないかと提案した。それならば、HCO⁺ を実験室で作って回転スペクトルを測定してやればこの問題は解決するはずである。ところが、当時このような分子イオンの回転スペクトルを検出した前例はまったくなかった。

電波天文学上のこの問題は、しかし、マイクロ波分光学に大きな刺激となった。放電プラズマ中にマイクロ波を通してスペクトルを測定することができるようになり、1975 年、ウィスコンシン大学の Woods らはついに HCO⁺ のスペクトルを水素と一酸化炭素の混合ガスの放電プラズマ中に検出することに成功した。実験室で測定された周波数は、X-ogen の周波数とぴったり一致した。その後、1970 年代半ばから、フリーラジカルや分子イオンのマイクロ波分光は飛躍的に発展した。その結果、星間空間でもこのような分子種が少しずつ見い出されるようになった。HCO, CCH, CCCCH, HNC, HNN⁺, HCS⁺ などがその例である。

そして、星間分子の第二の発見のピークは 1984 年から始まる。この頃から、大型のミリ波望遠鏡が動きはじめ、また、受信器や分光器の性能もぐんと良くなって、より弱いスペクトル線を受信できるようになった。このことと、最近のマイクロ波分光の進歩とがうまく組み合わせられて、いくつもの新しい分子を見つける力となっているのである。発見される分子もフリーラジカルや分子イオンが中心で、分子分光学の上でも知られていなかった分子が多い。

本稿では、最近、我々のグループが野辺山宇宙電波観測所の分子サーベイグループと共同で見い出した新しい星間分子、CCS, C₃S, および環状 C₆H について紹介し、その発見の意味について考えてみたい。

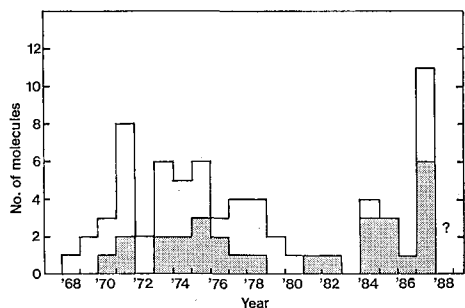


図 1 発見された星間分子の数。ハッチしたものはフリーラジカルや分子イオンなど実験室の環境では寿命の短い分子。

* 名大理 Satoshi Yamamoto: Search for New Interstellar Molecules

2. 実験室でのマイクロ波分光

フリーラジカルや分子イオンは直径 10 cm, 長さ 2 m のガラス管のセルの中で試料ガスを放電して作る。セルは真空ポンプで排気できるようになっており、常に新しいガスを供給しながらセルの中に置いた電極に高電圧をかけて放電させる。放電プラズマの中には、微量ではあるがフリーラジカルや分子イオンが生成するので、そのスペクトルを測定しようというわけである。

セルの両端はテフロン製のレンズでシールされていて、片側からマイクロ波を導入し反対側から出てきたマイクロ波をレンズで集めて検出器(液体ヘリウム冷却の InSb 検出器)で受ける。そして、マイクロ波の周波数を少しずつ変えながら分子による吸収スペクトルを測るのである。マイクロ波の光源としては、50-130 GHz 領域ではクライストロンを、160-500 GHz ではクライストロンと周波数逓倍器を用いている。検出感度を高めるため、クライストロンの周波数を周波数変調し、検出器の出力をそれに同期して位相検波する方法をとっている。分光器はマイクロコンピュータにつながれていて、スペクトルの積算、周波数の読みとりなどの処理ができる。システムのブロック図を図 2 に示す。

この分光器では、セルの中に僅か 0.1 ppm だけしか存在しないような分子のスペクトルでも検出することができる。分子の吸収強度は周波数の二乗ないし三乗に比例して大きくなる。このことは、同じ分子数でも高い周波数でスペクトルを測定したほうが強いスペクトルが得られるということである。生成してもほんの僅かなフリーラジカルや分子イオンのスペクトルを測定するには、一般に周波数の高いサブミリ波での分光が非常に有効なわけである。

我々はこの分光器を用いて、星間分子として存在する可能性があるフリーラジカルや分子イオンの検出を試み

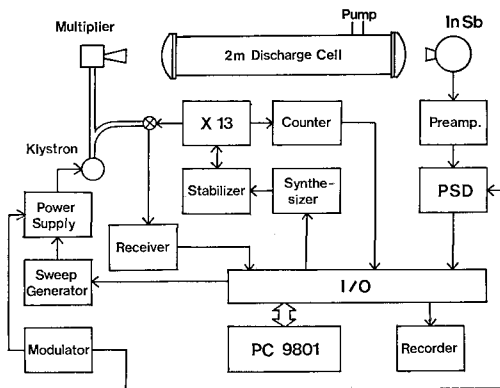


図 2 マイクロ波分光器のブロック図。セルの中の放電プラズマに存在する分子の回転スペクトルを測定する。

てきた。その中で最も大きな驚きだったのは、CCS の検出であった。

3. イオウを含む炭素鎖分子、CCS と C₃S の検出

1987 年の 1 月に、我々は分子科学研究所の川口建太郎さんと CS⁺ という分子イオンのスペクトルを見つけようと CS₂ と He 混合ガスを放電して分光器を動かしていた。いくらねばっても目的の CS⁺ のスペクトルは検出できなかったが、そのかわりに CCS ラジカルと思われる 3 本組のスペクトル線のシリーズを見つけた。この強い 3 本組のスペクトル線は約 13 GHz の間隔をおいて次々と現われた。回転スペクトルのパターンはおもに分子の慣性モーメントに依存する。約 13 GHz の間隔が CCS の予想される慣性モーメントから推定される値に近いこと、そして、CCS は三重項の電子状態を持つのでスペクトルは一般に 3 本組で現われると予想されることなどをもとに、新しく見つかったスペクトル線が CCS によるものと結論した。確認のために CC³⁴S のスペクトルも測定した。

CCS ラジカルは、これまで分光学的研究がまったくなく、また星間化学でも話題にのぼったことのない、いわば注目されない分子であった。しかし、そのスペクトルの解析を進めて低い周波数の遷移を予想させると、意外なことがわかった。CCS のひとつの遷移の周波数が、野辺山の 45 m 電波望遠鏡によって牡牛座暗黒星雲 (TMC-1) などで見つかった正体不明のスペクトル線 U45379 の周波数 (45379.0 MHz) と見事に一致したのである。この未同定線はアンテナ温度が TMC-1 で 2.2K もある輝線で、野辺山宇宙電波観測所の鈴木博子

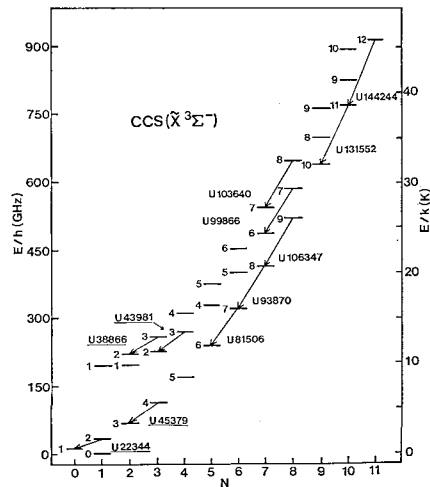


図 3 CCS のエネルギー準位図。N は回転量子数。矢印は帰属された星間未同定線。アンダーラインを引いたものが野辺山の 45 m 鏡により TMC-1 で見つかったもの。他は銀河中心で検出されていたもの。

(J,N) = (4,3)-(3,2) TRANSITION OF CCS

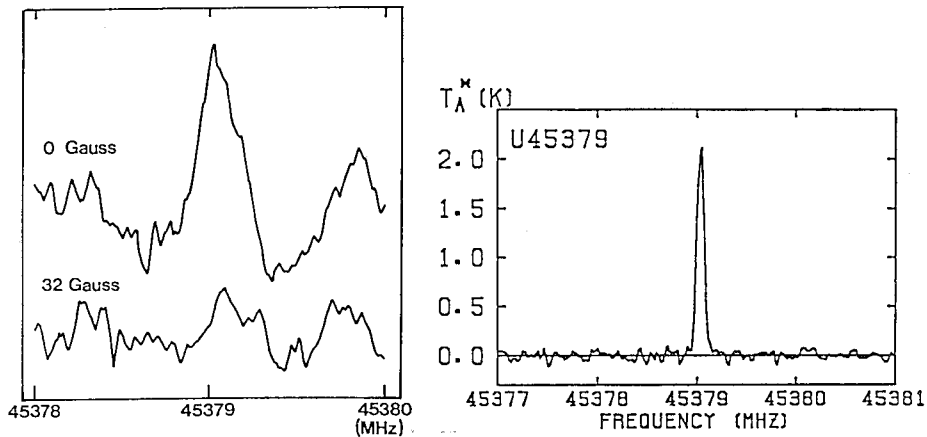


図 4 TMC-1 における U45379 のプロファイル (右) と対応する実験室のスペクトル (左)。CCS は常磁性を示すラジカルなので、32 ガウスの磁場をセルにかけることによりスペクトルは消失する。

さんらが 1984 年に報告して以来、世界中の分光、天文のグループがその正体を解き明かそうと努力を続けてきたものであった。そればかりではない、45 m 鏡でのラインサーベイにより TMC-1 で見つかった 3 本の未同定線 (U22344, U43981, U38866) も CCS のスペクトル線であることがわかった。また、Cummins らが銀河中心で見出していた 7 本の未同定線もやはり CCS に帰属された (図 3)。U45379 に対応するスペクトル線は実験室でも図 4 に示すように測定できた。

イオウを含むフリーラジカル、CCS が星間分子雲中に存在したのである。しかも、TMC-1 ではスペクトル線の強度から考えて存在量はかなり多そうだ。詳しい解析の結果、水素分子に対する存在比は 0.8×10^{-8} で、CS の 1×10^{-8} とあまり変わらないことがわかった。

これまで、TMC-1 では、 $HC_{2n+1}N$ や C_nH のような直線状に炭素が並んだいわゆる炭素鎖分子が多く見い出されてきた。CCS が存在するならば、さらに炭素の鎖が伸びた $CCCS(C_4S)$ という分子もあるかもしれない。

C_3S の回転スペクトルはこの分子が一重項 ($^1\Sigma$) の電子状態を持つことを反映してその周波数は、 $\nu(J+1 \rightarrow J) = 2B(I+1)$ でほぼ与えられる。従って、回転量子数 J の異なる 2 本のスペクトル線の周波数の間には整数比関係が成り立つ。45 m 鏡で見つかった TMC-1 での未同定線のうちで CCS に帰属されなかった 3 本がこのような整数比関係を満たしていた。スペクトル線の間隔 ($2B$) も C_3S の慣性モーメントの値から予想されるものに近く、これが C_3S のスペクトル線である可能性は極めて高いと思われた。

そこで、すぐ実験室で CS_2 を放電して C_3S のスペクト

ルの検出を試みた。未同定線の周波数はいずれも実験室でスペクトルを測定するには低すぎるので、それらから予想される高い周波数の別の遷移を捜した。すると、ねらった周波数のところに次々と強い吸収線が観測できた。間違いなく、 C_3S のスペクトルである。我々は確認のため、 $C_3^{84}S$ のスペクトルも実験室で測定した。

CCS に続いて C_3S も星間分子として存在することがわかった。新しい炭素鎖分子— C_nS ($n=1, 2, 3$) の登場である。結局、野辺山の 45 m 鏡によって TMC-1 で見つかった 7 本の強い未同定線はすべて CCS と C_3S に帰属された。

4. 星間分子 CCS と暗黒星雲

新しい星間分子、CCS と C_3S 。これらの発見は星間化学に大きなインパクトを与えた。これまでイオウはその宇宙存在度が少ないため星間化学の分野でも重要視されていなかった。CS, SO, SO_2 , OCS などのイオウを含む分子が暗黒星雲よりもオリオン (KL) や銀河中心のような活発な星形成領域で多く見い出されていたことから、イオウの化学は衝撃波の化学反応に対する効果といった観点から議論されることが多かった。しかし、TMC-1 における CCS, C_3S の発見はイオウの化学のまったく別の面を見せてくれた。暗黒星雲の化学を代表する直線炭素鎖分子の生成の化学と不可分であることがわかったのである。CCS はそれではどのような天体に多く存在する分子なのだろうか。

鈴木博子さんが中心になって種々の天体での CCS サーベイ観測が昨年 11 月に行われた。(とても悲しいことに、この観測の直後に鈴木さんは自動車事故で急逝

された。) CCS の $J_N=4_3-3_2$, $J_N=2_1-1_0$ という遷移は TMC-1 でそれぞれ 2.2K, 1.2K と強く, このようなサーベイを効率良く行なうことができた. その結果, サーベイした約 50 の暗黒星雲のうち 29 の暗黒星雲で CCS のスペクトルが受信できた. CCS の柱密度を求めて HC_3N や HC_5N の柱密度と比較してみると, CCS とこれらの分子の間にはよい正の相関があることがわかった (図 5 a, b). CCS は HC_3N や HC_5N といった炭素鎖分子とその生成過程が共通していることがはっきりと示された. 一方, CCS は NH_3 とは明らかに異なる分布を示している (図 5 c).

図 5 d は CCS の柱密度と Myers らによって報告されている C^{18}O の柱密度との比較である. 相関はあまり強くなく, C^{18}O がたくさんあっても, CCS が少ない天体がかなりある. それらの中には, 分子流を伴う星形成領域が含まれる. C^{18}O のスペクトルは光学的に薄く, ほぼ物質の量を反映していると考えてよい. CCS は多くの物質が集まっている所に必ずしも多く存在するわけ

はなく, その物理的環境に強く依存していると言える.

CCS は星形成の進んでいない低温で静かな暗黒星雲で特に多く存在している分子のようである. そして, 星が生れていく過程で消え去っていくのであろうか? CCS および C_3S の暗黒星雲における生成と反応の化学を定量的に理解することが急務となっている.

5. 環状 C_3H ラジカルの検出

暗黒星雲で見られる特徴的な分子の一群は直線 C_nH ($n=1\sim 6$) ラジカルである. まっすぐに伸びた炭素の鎖の端に水素原子がついた分子である. しかし, どうして炭素の鎖はまっすぐにのびるのだろうか? くるっとまるまって環状になった異性体はないのだろうか? そのはじめての例として, 我々は環状になった C_3H ラジカルのスペクトルを実験室と TMC-1 で見つけることに成功した.

直線 C_3H ラジカルは大きな振電相互作用を示す分光学的にも興味ある分子である. 我々はそのような関心か

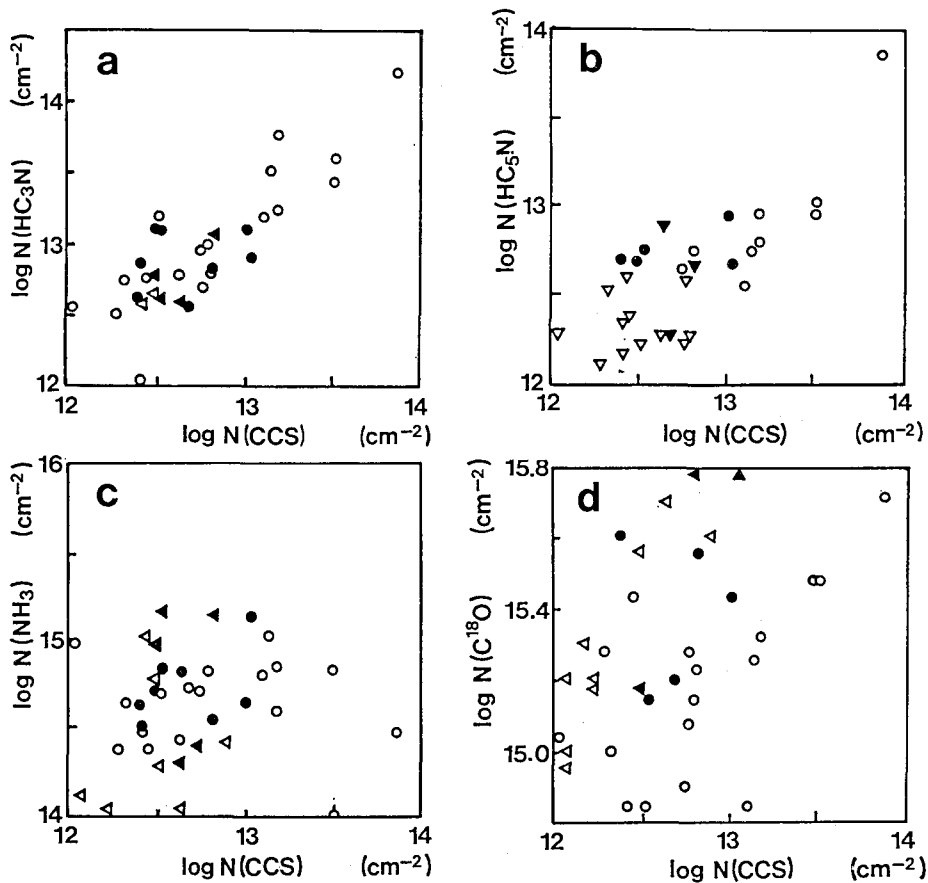


図 5 種々の暗黒星雲における CCS と HC_3N , HC_5N , NH_3 , C^{18}O の柱密度の相関. Δ は上限値を示す. 中塗りの記号は星形成の起こっている暗黒星雲.

ら、実験室でアセチレン、一酸化炭素、ヘリウムの混合ガスを放電して直線 C_3H を生成し、その振動励起状態のスペクトルを詳しく調べていた。その過程で、我々は直線 C_3H の振動励起状態のスペクトルの他に、何か別の分子種によると思われるスペクトル線を見つけた。それらは約 150-200 MHz 位で対になっており、そしてあるものはそれぞれが超微細構造と思われる 2 本に分裂していた。スペクトル線はセルに磁場を加えるとゼーマン効果により消失し、スペクトルを与える分子がフリーラジカルであることがわかった。我々は、220-300 GHz のほぼ全域について、このような特徴を持つスペクトル線を拾い出した。スペクトルの一例を図 6 に示す。

このスペクトル線群の帰属は CCS や C_3S ほど容易ではなかった。しかし、図 7 のような環状分子と考えるとパターンが説明でき、それにもとづいて帰属が可能になった。この分子は a 軸のまわりに一対の等価な炭素原子のみを持つ。そのため、ある種の回転準位がボーズ統計により禁じられる。このことが帰属の決め手になった。反応系に CO を用いていたので、分子が酸素原子を含んでいることも考えられた。しかし、 $C^{18}O$ を使ってスペクトルを測定してもまったく同じスペクトルが得られるので、その可能性は否定された。

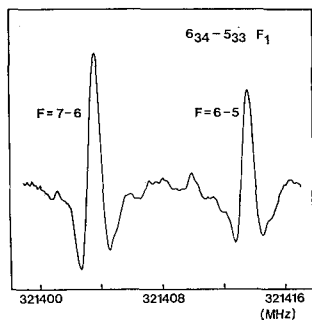


図 6 環状 C_3H の実験室でのスペクトルの一例。水素原子の核スピンの超微細相互作用のため 2 本に分れている。

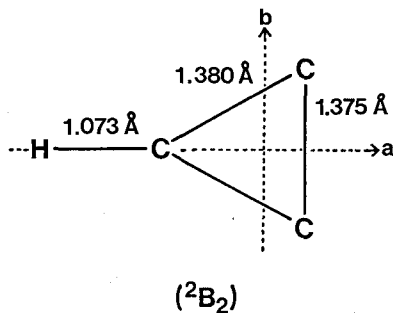


図 7 環状 C_3H の分子構造。

直線 C_3H ラジカルの環状の異性体はやはり存在したのである。この分子については、実験的にも理論的にもまったく知られていなかった。実験室でスペクトル線がとらえられ帰属がついたといっても少々不安である。そこで北大の村上明德さんに依頼して、分子軌道法計算をして環状 C_3H ラジカルの分子構造を予想してもらった。その構造から計算した慣性モーメントの値はスペクトルの解析から得られた値とほぼ一致することがわかった。

直線形の C_3H ラジカルは暗黒星雲や晩期型星の周辺でよく見い出されてきた。とすれば、その異性体である環状の C_3H ラジカルも星間分子としてこのようなところに存在するのではないだろうか……。我々は実験室で環状 C_3H が見つかった直後に、野辺山宇宙電波観測所の海部宣男さんに話を持ちこんだ。

環状 C_3H は 91.5 GHz に $2_{12}-1_{11}$ という遷移を持つ。野辺山宇宙電波観測所の分子サーベイグループと我々はさっそくこのスペクトル線の検出を 45 m 鏡を用いて行なった。望遠鏡を TMC-1 に向けて積分すること約 1 時間。 $2_{12}-1_{11}$ 遷移の 4 本の微細、超微細構造線のうち、最も強い 91494 MHz のラインが顔を出した。TMC-1 が八ヶ岳の向こうに沈んでしまうまでの 10 時間で、4 本のラインがはっきりと受信できたのである (図 8)。

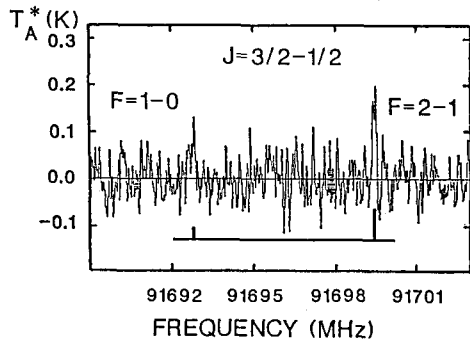
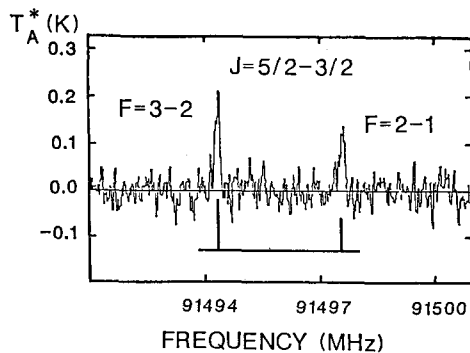


図 8 TMC-1 での環状 C_3H のスペクトル。 $2_{12}-1_{11}$ 遷移は電子スピンと回転の相互作用により大きく 2 つに分れ (上下)、さらにそれぞれが水素原子の核スピンによって 2 本に分れる。

環状 C_3H ラジカルはエネルギー的に 18 kcal/mol だけ直線 C_3H ラジカルより不安定である。それにもかかわらず、TMC-1 で受信したスペクトル線の強度から環状 C_3H の柱密度を見積ってやると 6×10^{12} 個/cm² となり、直線 C_3H の柱密度 5×10^{12} 個/cm² とほぼ同じであることがわかった。一方、直線 C_3H がとても多いことで知られる赤色巨星 IRC+10216 では環状 C_3H のスペクトルは受信できなかった。この二つの天体は炭素鎖分子の宝庫として知られるが、直線、環状 C_3H の生成の化学が両者でまったく違っていることがわかる。

環状 C_3H ラジカルはこれまで認識されたことのない分子だが、その生成のメカニズムを考えると当然存在すべき分子なのである。もともと直線 C_3H は $C_3H_3^+$ というとびきり安定なイオンと電子との解離性再結合によって生成するといわれている。この再結合反応の生成物はひとつではなく、星間空間に広く存在する環状 C_3H_2 という分子もそのひとつである。そして今回見つかった環状 C_3H もこの再結合反応で生成しうるのである。TMC-1 で環状 C_3H と直線 C_3H の存在量が等しいということは、 $C_3H_3^+$ の再結合反応で両者への反応の分岐比が1であることを示している。

IRC+10216 での直線 C_3H の生成は上に示したものとはずいぶん違うと言えるだろう。上記のようなイオン-

分子反応による生成とは別な熱平衡反応によって支配されているのだろうか。そのような条件では、安定な異性体(直線 C_3H) が優先的に存在するからである。直線 C_3H と環状 C_3H の比は炭素鎖分子生成のプロセスを区別する鍵と言えるだろう。

6. おわりに

新しい分子を見つける努力は実験室でも観測でも今日も続いている。その後、我々は、振動励起した直線 C_3H ラジカルマイクロ波スペクトルを実験室で見出し、それにもとづいて IRC+10216 で見つかった未同定線 22 本を帰属できた。また、ごく最近、斎藤らにより新しい星間分子、 CH_2CN ラジカル、が発見された。その詳細は他にゆずる。

星間分子雲は我々の予想をはるかに越えた奇妙な分子を作り出しているかもしれない。そのような分子を一つ一つ明らかにすることは、星間分子雲の進化を化学の立場から解き明かす第一歩であり、また、その物理的状態を探る新しい道具を提供することにもつながる。そして、星間分子雲は地上の実験室では得られない低温かつ低密度の極限的な環境にあり、分子分光にとっても未知の分子を探す時なくてはならない素晴らしい実験室なのである。

天体観測専門誌

天文ガイド

8月号 定価450円+85 7月5日発売!

特集 8月12日のペルセウス座流星群

1時間あたり50個もの流星が、月の無い8月12日夜に見られます。いつ、どちらを見るかを解説。

この夏おすすめの星見の場所

富士山の火口の中へ行った話と、ハワイのビジョップ博物館とプラネタリウムを紹介します。

ニューフェイス・テストレポート

大型双眼鏡：富士写真光機の15cm F5.5、40倍と協栄産業の12.5cm 25倍。眼で直接宇宙を覗く方に。

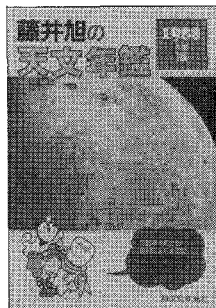
- 8月のスター・ウォッチング ● 8月の観測資料
- 観測ガイド ● 情報ボックス…など情報満載!!

新刊・近刊案内

藤井旭の天文年鑑 1988年度版

初めて星空をながめ、星の名前や星座をおぼえようとする人にもわかる、1988年4月から1989年3月までの天文現象を、くわしく、図を多く入れて解説した、楽しい天文ガイドブックです。

- 藤井 旭 著
- 定価520円+250



チロの天文シリーズ 藤井旭の星座ガイド夏

夏の星座、2時間ごとの動き、見つけ方を初めての人にもわかるようにやさしく図を中心に解説。

- 6月下旬発売予定 / 藤井旭著・予定価950円+250

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128